

УДК 539.21

Влияние давления пропан-бутановой смеси на морфологию углеродного наноматериала, формируемого в дуговом разряде*

М.А. Морозова¹, А.В. Ухина², А.В. Зайковский¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск*

E-mail: morozova.itp@gmail.com

Исследована морфология углеродного материала, формируемого в дуговом разряде в смеси и-бутана, н-бутана и пропана при распылении графит-никелевого электрода. Эксперименты проведены при изменении давления газовой среды. Обнаружены углеродные глобулы, графеновые структуры и углеродные нанотрубки. Установлено, что при давлениях 75 и 400 торр в получаемых материалах преобладают углеродные глобулы. При давлениях газа 200 торр в материале, собираемом с поверхности холодного экрана, присутствуют как графеноподобные структуры, так и значительное количество углеродных нанотрубок. Обсуждаются физические причины, влияющие на наблюдаемые явления.

Ключевые слова: дуговой разряд, наноматериалы, углеродные наночастицы, углеродные нанотрубки, пропан, бутан.

Введение

Одними из перспективных направлений управляемого синтеза наноматериалов являются плазмохимические методы, в число которых входит электродуговой синтез. Популярным он стал после пионерной работы Кратчмера, в которой описано получение макроскопического количества фуллеренов в электродуговой саже [1]. Затем получило развитие направление создания композитных материалов, состоящих из металлических, керамических и оксидных наночастиц, инкорпорированных в углеродную наноструктуру [2]. Также в продуктах электродугового синтеза впервые были обнаружены углеродные нанотрубки [3], что может найти применение для массового синтеза углеродных нанотрубок [4]. В специальных условиях [5] или при наличии определенных катализаторов [6, 7] электродуговой метод позволяет получать графеновые хлопья. Кроме того, в продуктах электродугового синтеза могут присутствовать такие структуры, как

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00139, <https://rscf.ru/project/22-79-00139>). Работа выполнена при использовании оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН.

углеродные глобулы [8], нанорожки [9], бамбуковые наноструктуры [10], различные нановолокна [7, 11], полые сферические наночастицы [12, 13].

Состав и морфология получаемых наноматериалов зависит от условий синтеза: тока и напряжения разряда, давления и состава буферного газа, химического состава распыляемого электрода [7, 14, 15].

Одно из направлений электродугового синтеза — получение композитного никель-углеродного наноматериала [16]. Дело в том, что никель является активным катализатором, взаимодействующим с углеродом, позволяющим получать такие углеродные наноструктуры, как углеродные нанотрубки (УНТ) [17] и графеновые плоскости [18]. Механизмы формирования УНТ включают образование металлической частицы, насыщенной углеродом, которая при остывании выделяет углерод на поверхности в виде УНТ [19]. Такой механизм в более развитом виде получил название пар – жидкость – твердое тело [20]. Дальнейший рост продолжается также за счет миграции осаждающегося углерода по частице катализатора [21]. Можно считать установленным, что формирование углеродной нанотрубки начинает происходить при перенасыщении каталитической частицы углеродом [22]. Отметим, что в качестве катализатора для роста нанотрубок, наряду с Fe, Co, Ni, могут использоваться Au, Cu, Pd, Ag, Pt, Pd, Mn, Mo, Cr, Sn, Mg, Al при синтезе на подложках [23].

Стоит рассмотреть различные источники углерода, используемые для формирования углеродных нанотрубок. Углеродные прекурсоры могут быть как в твердом, так и в жидком или газообразном состоянии. К твердым прекурсорам можно отнести углеродную сажу [24] и уголь [25]. Для синтеза УНТ применяют жидкие прекурсоры, например, толуол [26] или поливиниловый спирт [27]. Используют также углеводородные газы: метан [28], этилен [29], пропан [30]. Заметим, что при использовании любого источника углерода формирование структуры УНТ происходит после разложения прекурсора до атомарного и молекулярного уровней.

В работах [31 – 35] исследовано влияние давления буферного газа на выход УНТ и показано существование оптимального давления, при котором содержание УНТ в продуктах синтеза будет максимальным. Результаты экспериментов [33] показали, что при использовании He, N₂ и воздуха значения оптимальных давлений составляют 500, 100 и 60 торр соответственно. В работе [34] при использовании воздуха в качестве буферного газа также наблюдался максимум производства УНТ при давлении в диапазоне 45–90 торр.

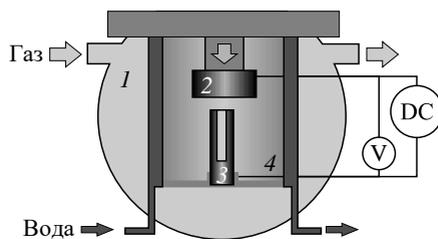
Вследствие большого количества разнообразных физических и химических процессов теоретические исследования в данном направлении существенно затруднены и на первый план выходят экспериментальные исследования. В настоящей работе изучается процесс формирования углеродных наноматериалов в процессе электродугового разряда в среде пропан-бутановой смеси. Основанием для проведения исследования является отсутствие публикаций, где используется указанный состав буферного газа.

1. Методы и материалы

Для проведения плазмохимического синтеза был использован электродуговой реактор, состоящий из герметичной вакуумной камеры 1 объемом 5 л (рис. 1). В камере реактора располагались два электрода: катод 2 из графита, который имел форму цилиндра диаметром 20 мм и длиной 12 мм, и композитный анод 3. Анод представлял собой цилиндрический стержень длиной 80 мм и диаметром 8 мм. По оси стержня имелась полость глубиной 50 мм и диаметром 5 мм, заполненная смесью порошков графита и никеля в массовом соотношении 1:1. Электроды были подключены к источнику постоянного тока (DC). Сила тока в экспериментах составляла 100 А. Между электродами

Рис. 1. Схема электродугового реактора.

1 — вакуумная камера, 2 — катод, 3 — композитный анод, 4 — водоохлаждаемый экран.



зажигался электродуговой разряд. Напряжение между электродами поддерживалось с постоянным значением 23 В. Рабочий газ состоял из и-бутана (85 %), н-бутана (10 %), пропана (5 %). Проток газа через реактор осуществлялся в импульсном режиме, включая стадии откачки и напуска газа в камеру реактора. Эксперименты проводились при давлениях 75, 200 и 400 торр, для которых каждый цикл длился 84, 42, 22 с соответственно. В конце цикла из камеры реактора откачивался газ до давления 45, 170 и 370 торр и напускалась новая порция пропан-бутановой смеси до достижения значений давления 75, 200 и 400 торр. Каждая новая порция газа составляла 0,5 г пропан-бутановой смеси. Заметим, что давление в камере реактора немного повышалось за счет нагрева газа, разложения углеводорода и образования водорода в продуктах синтеза. Продолжительность экспериментов составляла 7, 12, 14 мин для давлений 75, 200 и 400 торр соответственно. Процессы, происходившие при электродуговом разряде, приводили к испарению материала анода, формированию каталитических наночастиц никеля в газовой фазе, их взаимодействию с буферным газом и образованию углеродных наноструктур. Сформированный наноматериал осаждался на водоохлаждаемом экране 4, расположенном на расстоянии 50 мм от оси разряда. После выключения дугового разряда и остывания внутренних частей реактора сформированные материалы собирались с поверхности водоохлаждаемого экрана. Собранные материалы исследовались различными методами структурного анализа.

Для проведения раман-спектроскопии был использован спектрометр LabRAM HR Evolution (Horiba-JobinYvon, Германия) с излучением с длиной волны 512 нм. Для проведения рентгенофазового анализа применялся дифрактометр D8 ADVANCE X-Ray (BrukerAXS, Германия), использующий $\text{Cu-K}\alpha$ -излучение с длиной волны 1,54 Å. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) была проведена с помощью микроскопа SN-3400N (Hitachi, Япония). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) была проведена с использованием микроскопа LIBRA 120 (Carl Zeiss, Германия).

2. Результаты и обсуждения

Собранные материалы исследовались при помощи раман-спектроскопии. Спектры материалов, собранных с водоохлаждаемого экрана, показаны на рис. 2. На всех спектрах

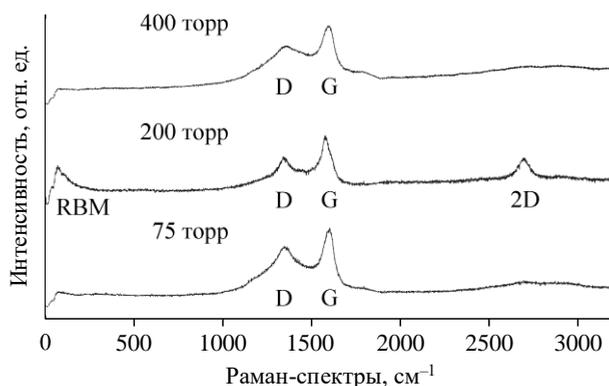


Рис. 2. Раман-спектры синтезированных материалов.

присутствуют пики, отвечающие углеродной структуре. Пик G относится к колебаниям связей sp^2 -гибридизованных атомов углерода. Пик D относится к радиальным колебаниям гексагональных колец в графитовой структуре, он появляется только на краях и дефектах графитовой структуры. Пик 2D является второй модой пика D, его соотносят с графеновой структурой. Пик 2D появляется в материале, собранном в эксперименте с использованием давления 200 торр. На этом спектре присутствует пик RBM, который относят к радиальным «дыхательным» колебаниям углеродных нанотрубок. Анализируя спектры исследуемых материалов можно заключить, что все материалы содержат графитоподобные структуры. Подобные структуры, полученные с использованием данного электродугового реактора, ранее были подробно исследованы в работах [8, 36]. В них было показано, что в этих материалах углеродная структура представляет собой агломераты и агрегаты разветвленных цепочек глобулярных углеродных частиц. В свою очередь, глобулярные частицы имеют форму, приближенную к шару, и состоят из смеси разупорядоченного и графитизированного углерода. В структуре разупорядоченного углерода отсутствуют какие-либо признаки дальнего порядка. В отличие от разупорядоченного, графитизированный углерод имеет структуру, в которой углеродные атомы формируют графитовые плоскости. Такие плоскости могут складываться в стопки, закручиваться в рулоны или образовывать замкнутые структуры [36]. Можно также утверждать, что в материалах, спектры которых имеют характерный 2D-пик, содержатся графенизированные углеродные структуры, состоящие из одного или нескольких графеновых листов. В работах [14, 16] было показано, что на поверхности наночастиц металлических катализаторов формируются тонкие графеновые слои, окружающие наночастицу. Особое внимание следует уделить материалу, полученному при давлении 200 торр, раман-спектры которого имеют характерно выраженный RBM-пик, что дает основание полагать, что в этом материале содержатся углеродные нанотрубки.

При исследованиях методами СЭМ и ПЭМ наблюдались различные структурные формы, присутствующие в синтезированных материалах. Структура углеродного материала, полученного при давлении 200 торр, представляет собой углеродные волокна с множеством ответвлений волокон меньшего диаметра (CNTs) (рис. 3a, 3b, 3f). Учитывая присутствие RBM-моды на раман-спектрах данного материала, логично предположить, что эти волокна имеют структуру многостенных углеродных нанотрубок. На рис. 3c показан ПЭМ-снимок углеродных глобул (CG), на рис. 3d — графеновых хлопьев (GF), присутствующих в синтезированных материалах. В материалах также наблюдаются скопления и цепочки полых углеродных наночастиц (HCNPs) (рис. 3e, 3f). В цепочке таких частиц (см. рис. 3e) крайняя частица содержит более плотную никелевую частицу (NiNP). Формирование подобных частиц в присутствии никелевых катализаторов наблюдалось ранее и подробно описано в [37]. Суть процесса заключается в выделении углерода из горячей никелевой наночастицы при остывании и формировании углеродной оболочки вокруг наночастицы. Образование новых углеродных слоев приводит к напряжению углеродной оболочки и давлению на никелевую частицу, в результате углеродная оболочка разрывается, а никелевая частица покидает ее, оставляя пустую полость, после чего начинается процесс формирования новой углеродной оболочки.

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) показали, что материал содержит как графитовую структуру (пик G), так и структуру никеля (пики Ni) (рис. 4).

Ранее проведенные исследования [14] показали, что давление газа в камере реактора влияет как на температурное распределение, так и на распределение концентрации частиц углерода и металла в газовой фазе. В частности, было показано, что более высокие

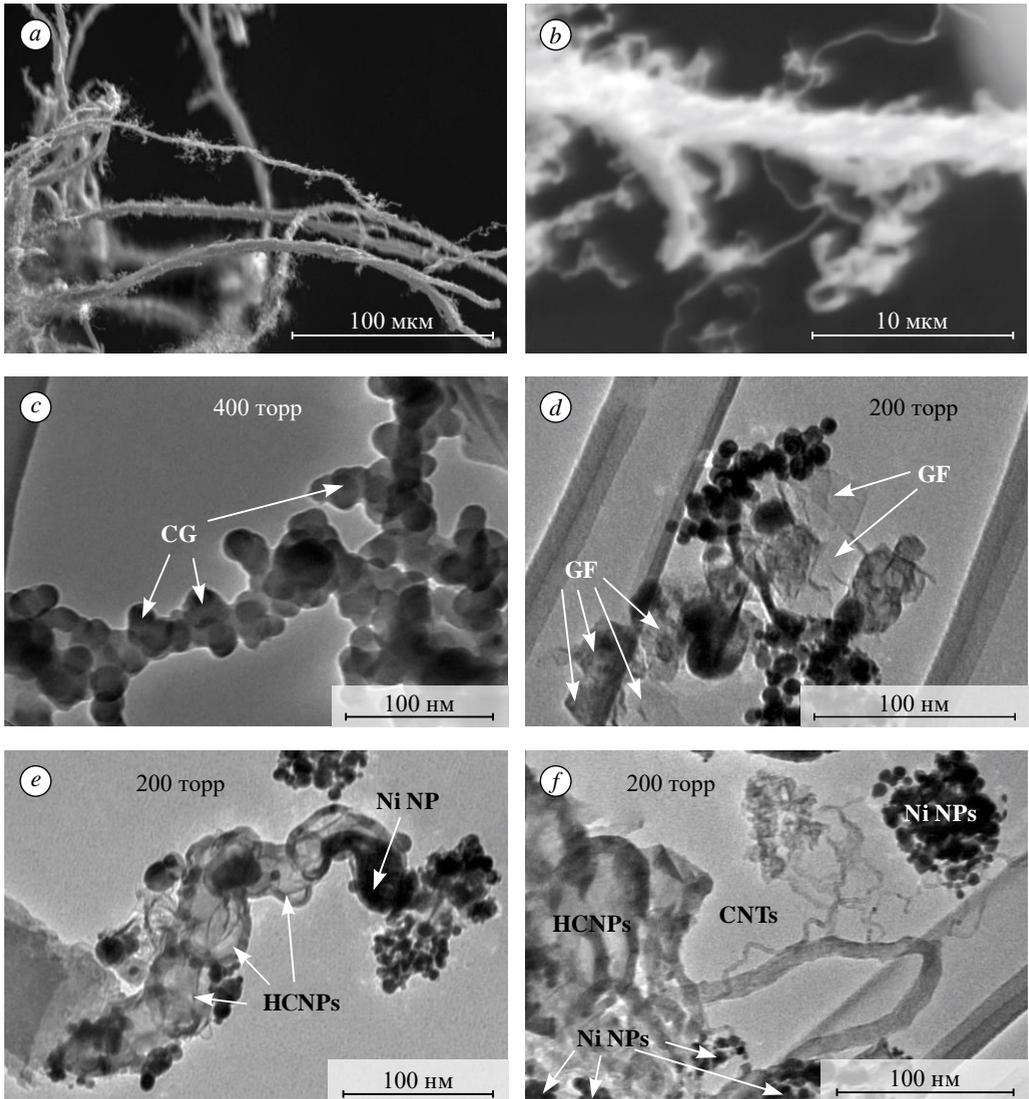


Рис. 3. Снимки СЭМ синтезированного материала (a, b), снимки ПЭМ структур, присутствующих в синтезированных материалах: углеродные глобулы (c), графеновые хлопья (d), полые углеродные наночастицы (e) и углеродные нанотрубки (f).

давления обеспечивают более высокие температуры в межэлектродном промежутке, но при этом более высокий градиент снижения температуры при удалении от горячих областей разряда, следовательно, более быстрое охлаждение образуемой газоплазменной системы. В зависимости от температуры газовая смесь меняет свой состав. Для качественного понимания реакций, происходящих при изменении температуры в пропан-бутановой смеси, были проведены расчеты равновесного

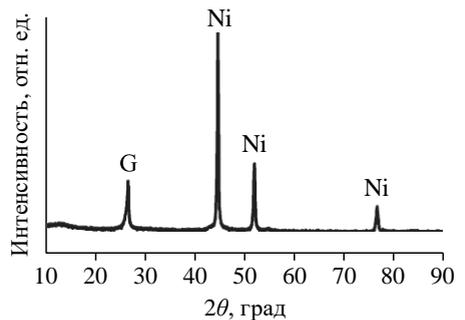


Рис. 4. РФА-спектр материала, синтезированного при давлении 200 торр.

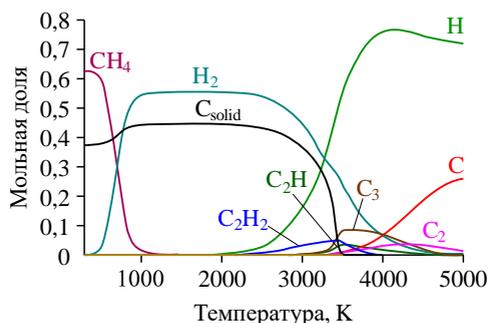


Рис. 5. Зависимость состава газовой смеси от температуры.

состава. Расчет был проведен с использованием программного обеспечения CEA NASA [38], в принципе работы которого заложены уравнения законов сохранения масс, квазинейтральности газоплазменной смеси, закона действующих масс и условия минимума энергии Гиббса. Данные условия описывают состояние химического равновесия, к которому стремится плазмохимическая система, образующаяся в процессе электродугового разряда. В качестве начальной смеси был выбран состав: и-бутан 85 %, н-бутан 10 % и пропан 5 %, соответствующий составу рабочего газа в экспериментах. Расчет был проведен в диапазоне температуры 300–5000 К. В расчете учитывались реакции, состав продуктов которых включал 98 компонентов, в том числе чистые углеродные компоненты C, C⁺, C⁻, C₂, C₂⁺, C₂⁻, C₃, C₄, C₅, C_{solid}.

На рис. 5 представлен пример результатов расчета при давлении 200 торр. При высокой температуре, которая реализуется в межэлектродном промежутке при электродуговом разряде, газовая смесь состоит в основном из атомарного углерода и водорода. При удалении от разряда температура уменьшается и в смеси появляются газовые компоненты C₂ и C₃, а водород образует молекулы H₂. При дальнейшем охлаждении углерод начинает формировать структуры конденсированного углерода (C_{solid}). Следует заметить, что только при температурах существенно ниже 1000 К конденсированный углерод способен вступать в реакцию с молекулярным водородом. Скорость таких реакций крайне мала, поэтому в камере реактора основным компонентом остаются конденсированные структуры углерода.

Полученные результаты показывают возможность одновременного существования различных компонентов в локальных областях в камере реактора в зависимости от температуры. Стоит обратить внимание, что в области температур, где начинается конденсация углерода, может присутствовать как атомарный, так и молекулярный водород. Известно, что присутствие водорода обеспечивает благоприятные условия для формирования графеновой структуры в дуговом разряде [5].

Результаты проведенного расчета не могут описать процессы взаимодействия углерода с никелем и дальнейшего формирования углеродной структуры. Однако никель хорошо известен в качестве катализатора роста структуры графена и углеродных нанотрубок [39] и, как показали результаты структурного анализа, присутствие каталитических частиц никеля сказывается на формировании конденсированной углеродной структуры.

Заключение

В результате исследования обнаружено, что материалы, полученные при распылении графит-никелевого электрода в среде пропан-бутановой смеси, могут иметь в своем составе углеродные глобулы, полые графитизированные оболочки, графеновые структуры и углеродные нанотрубки.

Предполагаемые механизмы формирования вышеперечисленных углеродных структур включают несколько процессов. Электродуговое распыление электродов приводит

к образованию атомарных компонентов электродов и разложению молекул углеводородного рабочего газа в горячей области дугового разряда. Распространение образуемой газоплазменной смеси в объем камеры реактора и смешивание с рабочим газом приводят к процессам охлаждения и конденсации углеродного и никелевого компонентов. При этом состав разлетающейся газовой смеси не является однородным и присутствуют локальные области с различными составами. Углеродные глобулы образуются в результате гомогенной конденсации углеродного пара. Благоприятным условием для формирования графеновых структур является присутствие водорода. Наличие никелевых наночастиц приводит к насыщению никеля углеродом и выделению графитизированной оболочки при остывании. Формирование структуры углеродных нанотрубок можно объяснить взаимодействием сформированных никелевых наночастиц с углеводородным газом в камере реактора, что приводит к диссоциации молекул углеводорода на поверхности никеля и формированию углеродной структуры в форме УНТ.

Было обнаружено, что для разного давления рабочего газа формируется разная морфология материала. Использование давления рабочего газа 75 и 400 торр приводит к формированию в основном только углеродных глобул на поверхности холодного экрана. В материале, полученном при давлении пропан-бутановой смеси 200 торр, на холодном экране обнаружено присутствие углеродных нанотрубок. Формирование структуры УНТ при давлении 200 торр можно объяснить выполнением условий достаточно высокой температуры никелевых каталитических частиц и потока углерода на их поверхность. При использовании давления 400 торр никелевые наночастицы быстро охлаждаются при разлете в камере реактора, а давление пропан-бутановой смеси 75 торр не обеспечивает необходимого потока углерода на поверхность никелевых наночастиц.

Общий вывод работы состоит в том, что использование пропан-бутановой смеси в качестве рабочего газа при электродуговом испарении графит-никелевых электродов позволяет получать различные углеродные наноструктуры, включая углеродные нанотрубки, графеновые хлопья и углеродные глобулы. Установлено, что давление влияет на морфологию получаемого углеродного материала. Использование давления 200 торр приводит к формированию большего разнообразия углеродных наноструктур, включая углеродные нанотрубки, графеновые хлопья, полые углеродные наночастицы и углеродные глобулы. Использование большего (400 торр) или меньшего (75 торр) давления приводит к формированию в основном углеродных глобул.

Авторы благодарят проф. Колесова Бориса Алексеевича за помощь в проведении раман-спектроскопии. Также авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение исследований при помощи просвечивающей электронной микроскопии.

Список литературы

1. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K. Solid C₆₀: a new form of carbon // *Nature*. 1990. Vol. 347, No. 6291. P. 354–358.
2. Scott J.H.J., Majetich S.A. Morphology, structure, and growth of nanoparticles produced in a carbon arc // *Phys. Rev. B*. 1995. Vol. 52, No. 17. P. 12564–12571.
3. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354, No. 6348. P. 56–58.
4. Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review // *Diamond and Related Materials*. 2014. Vol. 50. P. 135–150.
5. Subrahmanyam K.S., Panchakarla L.S., Govindaraj A., Rao C.N.R. Simple method of preparing graphene flakes by an arc-discharge method // *J. Phys. Chem. C*. 2009. Vol. 13, No. 11. P. 4257–4259.
6. Smovzh D.V., Kostogrud I.A., Sakhapov S.Z., Zaikovskii A.V., Novopashin S.A. The synthesis of few-layered graphene by the arc discharge sputtering of a Si-C electrode // *Carbon*. 2017. Vol. 112. P. 97–102.

7. **Zaikovskii A.V., Kardash T.Y., Kolesov B.A., Nikolaeva O.A.** Graphene, SiC and Si nanostructures synthesis during quartz pyrolysis in arc-discharge plasma // *Phys. Stat. Sol. A*. 2019. Vol. 216, No. 14. P. 1900079-1–1900079-8.
8. **Zaikovskii A.V., Novopashin S.A.** Electroconductive and magnetic properties of pure carbon soot produced in arc discharge: Regimes of various buffer gas pressure // *Phys. Stat. Sol. A*. 2017. Vol. 204, No. 10. P. 1700142-1–1700142-6.
9. **Li N., Wang Zh., Zhao K., Shi Zu., Gu Zh., Xu Sh.** Synthesis of single-wall carbon nanohorns by arc-discharge in air and their formation mechanism // *Carbon*. 2010. Vol. 48, No. 5. P. 1580–1585.
10. **Shen Y., Lua A.C.** Synthesis of Ni and Ni-Cu supported on carbon nanotubes for hydrogen and carbon production by catalytic decomposition of methane // *Appl. Catal. B*. 2015. Vol. 164. P. 61–69.
11. **Zaikovskii A., Novopashin S., Maltsev V., Kardash T., Shundrina I.** Tin-carbon nanomaterial formation in a helium atmosphere during arc-discharge // *RSC Adv*. 2019. Vol. 9. P. 36621–36630.
12. **Smovzh D.V., Sakhapov S.Z., Zaikovskii A.V., Novopashin S.A.** Morphology of aluminium oxide nanostructures after calcinations of arc discharge Al-C soot // *Ceram. Int*. 2015. Vol. 41. P. 8814–8819.
13. **Smovzh D.V., Sakhapov S.Z., Zaikovskii A.V., Boyko E.V., Solnyshkina O.A.** Arc discharge sputtering model of Mg–Al–C anode for the nanoceramics production // *Vacuum*. 2022. Vol. 196. P. 110802-1–110802-8.
14. **Zaikovskii A., Yudin I., Kozlachkov D., Nartova A., Fedorovskaya E.** Gas pressure control of electric arc synthesis of composite Sn–SnO₂–C nanomaterials // *Vacuum*. 2022. Vol. 195. P. 110694-1–110694-9.
15. **Zaikovskii A.V., Iurchenkova A.A., Kozlachkov D.V., Fedorovskaya E.O.** Effects of tin on the morphological and electrochemical properties of arc-discharge nanomaterials // *JOM*. 2021. Vol. 73, No. 3. P. 847–855.
16. **Zaikovskii A., Ukhina A., Mateyshina Yu.** Electric arc synthesis of composite Ni–C, NiO–C nanomaterials: structure and electrochemical properties // *Phys. Stat. Sol. A*. 2022. Vol. 219, No. 14. P. 2200111-1–2200111-6.
17. **Makris T.D., Giorgi L., Giorgi R., Lisi N., Salernitano E.** CNT growth on alumina supported nickel catalyst by thermal CVD // *Diam. Relat. Mater*. 2005. Vol. 14, No. 3. P. 815–819.
18. **Dahal A., Batzill M.** Graphene–nickel interfaces: a review // *Nanoscale*. 2014. Vol. 6. P. 2548–2562.
19. **Saito Y., Yoshikawa T., Okuda M., Fujimoto N., Yamamuro S., Wakoh K., Sumoyama K., Suzuki K., Kasuya A., Niahina Y.** Cobalt particles wrapped in graphitic carbon prepared by an arc discharge method // *J. Appl. Phys*. 1994. Vol. 75. P. 134–137.
20. **Chaturvedi S., Dave P.N.** Design process for nanomaterials // *J. Mater. Sci*. 2013. Vol. 48. P. 3605–3622.
21. **Laurent C., Flahaut E., Peigney A., Rousset A.** Metal nanoparticles for the catalytic synthesis of carbon nanotubes // *New J. Chem*. 1998. Vol. 22. P. 1229–1237.
22. **Ding F., Bolton K.** The importance of supersaturated carbon concentration and its distribution in catalytic particles for single-walled carbon nanotube nucleation // *Nanotechnology*. 2006. Vol. 17. P. 543–548.
23. **Zhou W., Ding L., Liu Y.** Role of catalysts in the surface synthesis of single-walled carbon nanotubes // *Nano Res*. 2009. Vol. 2. P. 593–598.
24. **Doherty S.P., Buchholz D.B., Li B.-J., Chang R.P.H.** Solid-state synthesis of multiwalled carbon nanotubes // *J. Mater. Res*. 2012. Vol. 18, No. 4. P. 941–949.
25. **Qiu J., Wang Z., Zhao Z., Wang T.** Synthesis of double-walled carbon nanotubes from coal in hydrogen-free atmosphere // *Fuel*. 2007. Vol. 86. P. 282–286.
26. **Okada T., Kaneko T., Hatakeyama R.** Conversion of toluene into carbon nanotubes using arc discharge plasmas in solution // *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, No. 9. P. 4262–4265.
27. **Wang Y.-H., Chiu S.-C., Lin K.-M., Li Y.-Y.** Formation of carbon nanotubes from polyvinyl alcohol using arc-discharge method // *Carbon N. Y*. 2004. Vol. 42. P. 2535–2541.
28. **Kong J., Cassell A.M., Dai H.** Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes // *Chem. Phys. Lett*. 1998. Vol. 292. P. 567–574.
29. **Hussain A., Liao Y., Zhang Q., Ding E.X., Laiho P., Ahmad S., Wei N., Tian Y., Jianga H., Kauppinen E.I.** Floating catalyst CVD synthesis of single walled carbon nanotubes from ethylene for high performance transparent electrodes // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10. P. 9752–9759.
30. **Bang J.J., Guerrero P.A., Lopez D.A., Murr L.E., Esquivel E.V.** Carbon nanotubes and other fullerene nanocrystals in domestic propane and natural gas combustion streams // *J. Nanosci. and Nanotechnol*. 2004. Vol. 4. P. 716–718.
31. **Zhao T.** Gas and pressure effects on the synthesis of amorphous carbon nanotubes // *Chin. Sci. Bull*. 2004. Vol. 49, No. 24. P. 2569–2571.
32. **Kola M., Padya B.** Role of buffer gas pressure on the synthesis of carbon nanotubes by arc discharge method // *AIP Conf. Proceedings*. 2013. Vol. 1538. P. 200–204.
33. **Zhao J., Zhang J., Su Y., Yang Z., Wei L., Zhang Y.** Synthesis of straight multi-walled carbon nanotubes by arc discharge in air and their field emission properties // *J. Mater. Sci*. 2012. Vol. 47, No. 18. P. 6535–6541.
34. **Su Y., Zhou P., Zhao J., Yang Z., Zhang Y.** Large-scale synthesis of few-walled carbon nanotubes by DC arc discharge in low-pressure flowing air // *Mater. Res. Bull*. 2013. Vol. 48, No. 9. P. 3232–3235.

35. **Kim H.H., Kim H.J.** Preparation of carbon nanotubes by DC arc discharge process under reduced pressure in an air atmosphere // *Mater. Sci. Eng. B.* 2006. Vol. 133. P. 241–244.
36. **Zaikovskii A.V., Smovzh D.V., Sakhapov S.Z., Fedoseev A.V.** Morphological and structural features of materials formed in carbon plasma of arc discharge // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 1105. P. 012135-1–012135-7.
37. **Jia Z., Kou K., Qin M., Wu H., Puleo F., Liotta L.F.** Controllable and Large-Scale Synthesis of Carbon Nanostructures: A Review on Bamboo-Like Nanotubes // *Catalysts.* 2017. Vol. 7, No. 9. P. 256-1–256-21.
38. **Gordon S., McBride B.J.** Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications // NASA Reference Publication 1311. 1994. P. 1–58.
39. **Bokhonov B.B., Ukhina A.V., Dudina D.V., Katsui H., Goto T., Kato H.** Multiwalled carbon nanotube forests grown on the surface of synthetic diamond crystals // *Ceram. Int.* 2017. Vol. 43. P. 10606–10609.

*Статья поступила в редакцию 16 февраля 2023 г.,
после доработки — 18 апреля 2023 г.,
принята к публикации 15 июня 2023 г.*